

KLASIFIKÁCIA KRÁTKODOBÝCH POKLESOV NAPÄTIA V DISTRIBUČNÝCH SIEŤACH

CLASSIFICATION OF VOLTAGE DIPS IN DISTRIBUTION NETWORKS

Štefan Lojek, Alena Otčenášová

Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta ŽU v Žiline
Univerzitná 8251/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika, email: lojek@kete.utc.sk, alena.otcenasova@fel.utc.sk

Abstrakt V súčasnosti je problematike kvality elektrickej energie venovaná značná pozornosť, najmä v súvislosti s liberalizáciou trhu s elektrinou. Najčastejší problémom z hľadiska kvalitnej dodávky elektrickej energie sú krátkodobé poklesy a prerušenia napájacieho napätia. Každý krátkodobý pokles je možné zaradiť do jednej zo siedmich kategórií na základe rozloženia vektorov napätí počas poklesu v ustálenom stave. Na základe správneho zaradenia poklesu do danej kategórie je možné vyšetriť príčinu poklesu a napäťovú hladinu, z ktorej pokles napätia pochádza. Navyše je potrebné zohľadniť zapojenie transformátorov, ktoré menia rozloženie vektorov napätí v komplexnej rovine a tým vplývajú na voľbu zaradenia poklesu do správnej triedy.

Summary Today is much attention paid to power quality, especially in deregulated electricity market. Voltage dips and short power supply interruptions are the most frequently problems in this area. Every voltage dip can be categorized in to the one of the seven categories which are differ on voltage phasor diagrams in steady state. Correct categorisation of this vectors can reveal the cause of voltage dip and voltage level, in which voltage dip originate. It is important to know the transformers winding connection, which can change the voltage phasor diagram in complex plane and can have the negative influence on categorisation of the voltage dip in to the correct category.

1. ÚVOD

Základným normatívnym dokumentom v oblasti kvality elektrickej energie na Slovensku je norma STN EN 50 160 (33 0121): 2002 [1], ktorá definuje krátkodobý pokles napätia ako náhly pokles napájacieho napätia na hodnotu medzi 90 % a 1 % dohodnutého napätia, po ktorom nasleduje obnovenie napätia počas krátkeho časového intervalu. Konvenčná doba trvania krátkodobého poklesu napätia je medzi 10 ms a 1 minútou, hĺbka krátkodobého poklesu je definovaná ako rozdiel medzi minimálnou efektívnou hodnotou v priebehu krátkodobého poklesu a dohodnutým napätím. Pod pojmom dohodnuté napätie sa myslí menovité napätie siete, resp. napätie zmluvne potvrdené medzi dodávateľom a odberateľom. Zmeny napätia, ktoré neznižujú napätie na menej ako 90 % dohodnutého napätia sa nepovažujú za krátkodobé poklesy napätia [1]. V trojfázových sieťach sa za nekvalitnú dodávku elektrickej energie považuje stav, ak krátkodobý pokles napätia aspoň v jednej fáze nevyhovuje vyššie uvedenej podmienke.

2. PRÍČINY

Príčiny krátkodobých poklesov napätia je možné rozdeliť z hľadiska ich vzniku na:

- príčiny pochádzajúce z distribučnej siete,
- príčiny spôsobené odberateľom.

Medzi príčiny poklesov napätia pochádzajúcich z distribučnej sústavy patria poruchy na vedeniach alebo transformátoroch (skraty), rozbehy veľkých pohonov, prípadne spínanie veľkých záťaží.

Skraty (skratové prúdy) sú najčastejšou príčinou poklesov napätia. Skratový prúd tečie medzi

miestom skratu a zdrojom. Veľkosť tohto skratového prúdu závisí od trojfázového skratového výkonu v danom napájacom bode, od typu skratu a od impedancie obvodu, v ktorom preteká skratový prúd. V skratovanom obvode vyvolá väčšinou nesymetrický úbytok napätia (s výnimkou symetrických trojfázových skratov).

Ak sú medzi miestom napájania a miestom skratu paralelné odbočky, tieto budú tiež postihnuté úbytkom napätia, ktorý bude priamo úmerný súčinu pretekajúceho skratového prúdu a impedancie od danej odbočky po miesto skratu. Teda v závislosti na akej napäťovej hladine skrat nastal bude závisieť aj veľkosť „postihnutej“ oblasti, pretože väčšina distribučných sietí napäťovej hladiny 22 kV je zapojená lúčovito a siete 110 kV sú zapojené okružne. To znamená, že pokles napätia, ktorý vznikol v napäťovej hladine napr. 110 kV sa v rovnakej miere prejaví aj na ostatných nižších napäťových hladinách. Samotné „šírenie“ poklesu napätia významne závisí na zapojení transformátorov, ktoré sa nachádzajú v prenosovej ceste. Poklesy napätia budú charakteristické značnou hĺbkou poklesu a relatívne krátkym časom pôsobenia. Tento závisí najmä na rýchlosti detekcie poruchy a následnej reakcie ochrany. Približne 90 % porúch v distribučných sústavách býva prechodného charakteru [2]. Tu je nasadzovaná ochrana opätovného zapínania, ktorá pri vybudení spustí cyklus vypínania a opätovného zapínania. Medzi týmito stavmi nastáva u sériovo pripojených odberateľov pokles napätia o 100 %. U ostatných odberateľov cykly opätovného zapínania môžu spôsobiť sled poklesov s krátkou dobou trvania. Väčšinou sa táto doba pohybuje rádovo v jednotkách až desiatkach periód.

Ďalšou príčinou poklesov napätia sú rozbehy veľkých pohonov a spínanie veľkých záťaží. Tieto zariadenia počas rozbehu alebo spínania odoberajú niekoľko násobok svojho menovitého prúdu. Tento nadprúd taktiež spôsobí úbytky napätia na prívodnom vedení, prípadne v spoločnom napájacom bode (PCC), pretože sieť býva často dimenzovaná na menovitý prúd. Rozbehy pohonov sú charakteristické menšou hĺbkou poklesu ako poklesy spôsobené skratom. Väčšinou sú symetrické. Samotná hĺbka poklesu významne závisí od tvrdosti napájacej sústavy, resp. od trojfázového skratového výkonu v PCC, z ktorého je daný odber napájaný. Doba pôsobenia poklesu býva obvykle dlhšia ako pri skratoch. Je závislá na type pohonu a spôsobe jeho rozbehu. Trvanie poklesu býva rádovo sekundy.

3. KLASIFIKÁCIA POKLESOV

Analýza poklesu napätia

Každý pokles napätia (symetrický alebo nesymetrický) je možné matematicky popísať pomocou rozloženia fázorov napätí U_a , U_b , U_c na symetrické zložky napätia (súslennú U_1 , spätnú U_2 a netočivú U_0) pomocou Fortescuovej metódy (lineárnej transformácie) [3] nasledovne

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kde je

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle 120^\circ, \quad (2)$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = 1\angle -120^\circ. \quad (3)$$

Obdobne je možné previesť aj spätnú transformáciu pomocou inverznej matice

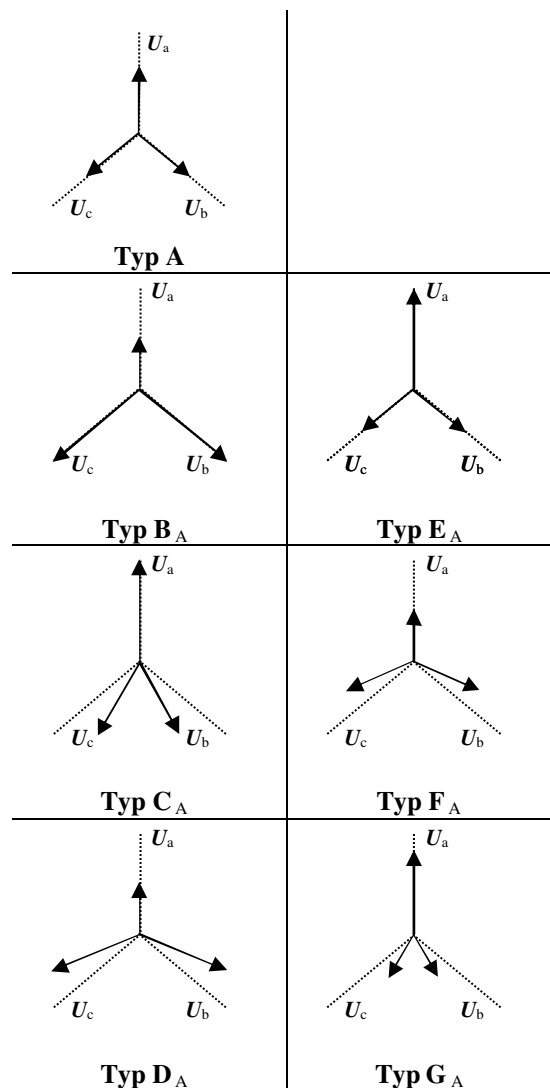
$$\begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Rovnakým spôsobom je možné použiť rovnice (1) a (4) pri analýze prúdov.

Symetrické poklesy napätia v zložkovej napäťovej sústave obsahujú iba súslennú zložkovú sústavu napätia. Nesymetrické poklesy, spôsobené napríklad medzifázovým skratom sa skladajú zo súslennej a spätnej zložkovej sústavy, poklesy spôsobené zemnými skratmi obsahujú navyše netočivú zložkovú sústavu, resp. zložku.

Triedy poklesov napätia

Na základe znalosti zložkových sústav sa poklesy napätia zaraďujú do príslušných tried, ktoré sa označujú písmenami A až G [4]. Ich fázorové diagramy sú znázornené na obr. 1.



Obr. 1. Fázorové diagramy jednotlivých tried (typov) poklesov napätia v trojfázovej ústave.

Fig. 1. Phasor diagrams for the different types of three-phase voltage dips.

Elektrické distribučné vedenia sa riešia ako obvody s rozloženými elektrickými parametrami. To znamená, že rozloženie fázorov napätí počas poklesu sa bude meniť so vzdialenosťou od zdroja napätia. Z tohto dôvodu sa zavádza parameter V (charakteristické zvyškové napätie). Vyjadrením tohto napätia v pomerných jednotkách ku pôvodnému napätiu pred poklesom platí nasledovné:

- $V = 0$ v mieste poruchy,
- $V = 1$ v bode napájania (predpokladá sa ideálny napäťový symetrický trojfázový zdroj).

V prípade zemných skratov je potrebné uvažovať aj s netočivou zložkou napätia, ktorá závisí na veľkosti

netočivej reaktancie vedenia (X_0). Zavedie sa pomer netočivej a súslednej reaktancie vedenia n pre, ktorý platí

$$n = \frac{X_0}{X_1}. \quad (5)$$

Popis jednotlivých typov poklesov

Typ A, ide o symetrický pokles napätia spôsobený trojfázový súmerným skratom medzi fázami, medzi fázami a zemou, súmerným spínaním záťaže alebo rozbehom veľkého trojfázového pohonu. Dochádza tu iba k zmene amplitúd napätí (v každej fáze rovnako). Z dôvodu symetrického poklesu sa zachováva vzájomný fázový posun medzi vektormi napätia. Platia nasledovné rovnice

$$\begin{aligned} U_a &= V, \\ U_b &= -\frac{1}{2} \cdot V - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V, \\ U_c &= -\frac{1}{2} \cdot V + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V. \end{aligned} \quad (6)$$

Typ B, ide o jednofázový skrat vo fáze A proti zemi, ktorý vznikol v sústave s priamo uzemneným uzlom transformátora (napr. siete 110 kV, 0,4 kV). Vyvinie sa nulová zložka napätia. Amplitúdy napätí vo fázach B a C ostávajú zachované. Nedochádza k vzájomnému fázovému posunu medzi vektormi napätia. Pre vektory napätí platí

$$\begin{aligned} U_a &= V, \\ U_b &= -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1-n}{2+n} \cdot (1-V), \\ U_c &= -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1-n}{2+n} \cdot (1-V). \end{aligned} \quad (7)$$

Typ C, ide o medzifázový skrat. Amplitúdy aj fázy napätí porušených fáz B a C sa menia v závislosti od pretekajúceho skratového prúdu. Nevyvinie sa nulová zložka napätia. Tento priebeh je možné namerať taktiež na napäťovej hladine 22 kV, ak nastal jednofázový skrat (vo fáze A) v sieti 110 kV, za predpokladu, že je v prenosovej ceste zapojený transformátor, cez ktorý sa netočivé zložky napätí neuzavrú, resp. navonok sa neprejavia (napr. Ynd1, Yny0 atď.).

Vektory porušených napätí si zachovávajú svoje reálne zložky, čo je charakteristické pre tento typ poruchy. Platia nasledovné rovnice

$$\begin{aligned} U_a &= 1, \\ U_b &= -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V, \\ U_c &= -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V. \end{aligned} \quad (8)$$

Typ D je možné namerať na napäťovej hladine 0,4 kV ak je v prenosovej ceste z hladiny 22 kV na hladinu 0,4 kV zapojený transformátor, ktorého primárne vinutie je zapojené do trojuholníka a sekundárne do hviezdy. Predpokladá sa, že skrat nastal medzi dvoma fázami na hladine 22 kV (typ C). Tento pokles sa cez hore uvedený transformátor prenesie na hladinu 0,4 kV ako pokles typu D. T. j. dvojfázový pokles na hladine vn sa nám na hladinu nn prenesie ako jednofázový pokles, pričom nastáva vzájomný posun medzi vektormi napätia. Pokles typu D je extrémnym prípadom poklesu typu B, ak sa z rovníc (7) odseparuje nulová zložka napätia ($n = 0$). Platí, že

$$\begin{aligned} U_a &= V, \\ U_b &= -\frac{1}{2} \cdot V - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \\ U_c &= -\frac{1}{2} \cdot V + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Typ E je charakteristický pre dvojfázový zemný skrat (napr. medzi fázami B, C a zemou) v sústave s priamo uzemneným uzlom transformátora (siete 110 kV alebo 0,4 kV). Vyvinie sa netočivá zložková sústava napätí. Ak by táto porucha vznikla v sústave s neúčinne uzemneným uzlom transformátora napätie „zdravej“ fázy by sa zvýšilo v závislosti na veľkosti nulovej zložky napätia. Takúto vektorovú hviezdu je možné namerať iba na hladine, kde vznikla porucha. Platia nasledovné rovnice

$$\begin{aligned} U_a &= \frac{3 \cdot n}{2 \cdot n + 1} - \frac{n-1}{2 \cdot n + 1} \cdot V, \\ U_b &= -\frac{1}{2} \cdot V - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V, \\ U_c &= -\frac{1}{2} \cdot V + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V. \end{aligned} \quad (10)$$

Typ G, je možné namerať v sieti 22 kV, ak v sieti 110 kV nastal vyššie popísaný dvojfázový zemný skrat (typ E). V prenosovej ceste sa predpokladá zapojený transformátor (napr. Yny0). T. j. netočivé zložky napätí z nadradenej sústavy nebudú ovplyvňovať napätia v „podradenej sústave“. Inak povedané dvojfázový zemný skrat sa bude javiť na sekundárnej strane hore uvedeného transformátora ako jednofázový skrat s tým, že sa čiastočne zmenia amplitúdy „neporušených“ napätí. Dôjde aj k zmene vzájomných fázových posunov medzi napätiami. Tento typ poklesu je popísaný rovnicami

$$\begin{aligned}
 U_a &= \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot V, \\
 U_b &= -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot V \right) - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V, \\
 U_c &= -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot V \right) + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V.
 \end{aligned} \quad (11)$$

Typ F je možné namerať ak v 22 kV sieti pôsobí pokles napätia typu G. Tento typ poklesu sa zmení na typ F len v prípade, že v prenosovej ceste (napr. z hladiny 22 kV na hladinu 0,4 kV) je zapojený transformátor, ktorého primárne vinutie je zapojené do trojuholníka a sekundárne do hviezdy (napr. Dyn1 atď.). Zapojenie transformátora spôsobí zmenu rovníc (11) nasledovne

$$\begin{aligned}
 U_a &= V, \\
 U_b &= -\frac{1}{2} \cdot V - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot V \right), \\
 U_c &= -\frac{1}{2} \cdot V + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot V \right).
 \end{aligned} \quad (12)$$

Ako názorný príklad „prechodu“ poklesu napätia cez jednotlivé napäťové hladiny uvádzam tab. 1. Predpokladá sa, že porucha nastala v sústave 110 kV, ktorej uzol transformátora je priamo uzemnený. V prenosovej ceste sú zapojené transformátory nasledovne:

- transformátor 110 kV / 22 kV, Yny0,
- transformátor 22 kV / 0,4 kV, Dyn1.

Tab. 1 „Prenos“ napäťových poklesov cez distribučné siete

Tab. 1 Dips location in distribution networks

Napäťová Hladina	Typ poruchy (skratu)			
	symetrický	2-f.	2-f.z.	1-f.
110 kV	A	C	E	B
22 kV	A	C	G	D
0,4 kV	A	D	F	C

Presná identifikácia jednotlivých typov poklesov

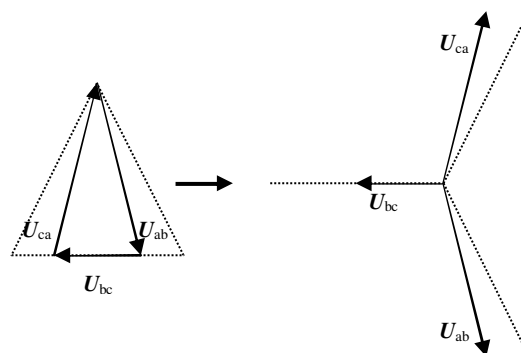
Aby bolo možné každý pokles presne charakterizovať, ktorá fáza bola poklesom „porušená“, je potrebné zaviesť ďalší parameter. Tento sa bude písať ako index ku jednotlivým typom poklesov. Indexy označujú písmenom fáz v ktorej si napätie:

- zachovalo svoj počiatočný uhol (v prípade poklesov typu C, D, F, G),
- ako jediné sa neprejavilo poklesom (typ E),
- ako jediné sa prejavilo poklesom (typ B).

Symetrický pokles sa indexom neoznačuje.

Napríklad dvojfázový skrat medzi fázami B a C na napäťovej hladine 110 kV sa označí ako pokles fázových napätí typu C_A (pozri obr. 1). Vektor fázy A si zachoval svoj počiatočný uhol (0°).

Doplnením vektorových diagramov na obr. 1 o vektory združených napätí je možné túto špecifikáciu poklesu napätia použiť obdobne pre združené napätia. Opäť sa predpokladá pôsobenie dvojfázového skratu medzi fázami B a C na napäťovej hladine 110 kV. Rozloženie vektorov združených napätí už zodpovedá poklesu typu D (pozri obr.2). V tomto prípade si zachováva svoj počiatočný uhol napätie U_{bc} (90°). Tento typ poklesu sa označí ako typ D_{BC}.



Obr. 2. Rozloženie vektorov združených napätí.

Fig. 2. Phasor diagrams of phase to phase voltages.

4. ZÁVER

Z hľadiska vyhodnocovania krátkodobých poklesov napätia je veľmi dôležité zaradiť každý pokles do vhodnej triedy. Na základe správneho zaradenia poklesu do danej kategórie je možné vyšetriť príčinu poklesu a napäťovú hladinu, z ktorej pokles napätia pochádza. Navyše je potrebné zohľadniť zapojenie transformátorov.

Toto triedenie vhodne dopĺňa a rozširuje štatistické hodnotenia ale najmä vypovedá o kvalite prevádzky distribučných sietí.

LITERATÚRA

- [1] STN EN 50 160 (33 0121): 2002, Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej distribučnej siete,
- [2] DUGAN, R., MCGRANAGHAN, M., et al.: Electrical Power Systems Quality, The McGraw-Hill Companies, 2002.
- [3] KOLCUN, M., CHLADNÝ, V., VARGA, L., a kol.: Analýza elektrizačnej sústavy, TU Košice 2005,
- [4] BOLLEN, M., GOOSSENS, P., et al.: Assessment of Voltage Dips in HV-Networks, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19, apríl 2004.